

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E

TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE

TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL



**THIAGO MANOEL DE ARAUJO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM AFINADOR AUTOMÁTICO PARA VIOLÕES**

**CAJAZEIRAS – PB  
2023**

**THIAGO MANOEL DE ARAUJO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM AFINADOR AUTOMÁTICO PARA VIOLÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial.

Orientador: Raphael Maciel de Sousa.

**CAJAZEIRAS – PB  
2023**

IFPB / Campus Cajazeiras  
Coordenação de Biblioteca  
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva  
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

A663d Araújo, Thiago Manoel de.  
Desenvolvimento de um afinador automático para violões / Thiago  
Manoel de Araújo – 2023.

40f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação  
Industrial) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da  
Paraíba, Cajazeiras, 2023.

Orientador(a): Prof. Dr. Raphael Maciel de Sousa.

1. Desenvolvimento de sistemas. 2. Instrumentos musicais. 3.  
Afinador automático. 4. Transformada de Fourier. I. Instituto Federal  
de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 681.5(043.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

THIAGO MANOEL DE ARAÚJO

DESENVOLVIMENTO DE UM AFINADOR AUTOMÁTICO PARA VIOLÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do Título de **Tecnólogo em Automação Industrial**, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras.

Aprovado em 24 de março de 2023.

**Membros da Banca Examinadora:**

Raphaell Maciel de Souza

IFPB - Unidade Acadêmica de Industria

Emanoel Raimundo Queiroz Chaves Júnior

IFPB - Unidade Acadêmica de Industria

Gemerson Valois da Mota Candido

IFPB - Unidade Acadêmica de Industria

Documento assinado eletronicamente por:

- **Raphaell Maciel de Sousa**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 31/05/2023 14:05:11.
- **Emanoel Raimundo Queiroz Chaves Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 31/05/2023 14:25:49.
- **Gemerson Valois da Mota Candido**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 31/05/2023 19:45:59.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 31/05/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 433786

Verificador: 0557f7cb7a

Código de Autenticação:



Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CAJAZEIRAS / PB, CEP 58.900-000  
<http://ifpb.edu.br> - (83) 3532-4100

*À minha avó, Antônia Dias de Sousa (in memoriam) por me mostrar a importância do cumprimento dos deveres, por moldar o meu caráter, me incentivar a buscar os meus sonhos, me proteger, e que hoje, me protege estando ao lado do criador.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Robertina Manoel Dias de Araújo, que sempre foi meu exemplo na vida, me mostrou que a educação abre portas para um futuro melhor, por mais difícil que sejam as circunstâncias para chegar até lá, ao meu pai, José Edinaldo Lopes de Araújo, pelos sábios ensinamentos do homem que nunca teve muita escolha a não ser trabalhar na roça, e que apesar da pouca oportunidade de estudar, sempre fez o seu máximo para proporcionar uma educação decente para mim.

Ao meu irmão Giordoni Manoel, que me estendeu a mão e me ensinou muitas lições para vida, ao meu primo Pedro Antônio, e um grande amigo Alisson Alberto, por me acolher e ficar do meu lado em todas as situações como um irmão.

Agradeço especialmente a minha companheira Maria Júlia, por me acalmar, me entender, e me ajudar em todos os momentos difíceis que em algum momento surgiram em meio a este caminho trilhado sem me deixar fraquejar, e por ter a oportunidade de poder desfrutar das belezas e momentos espetaculares que a vida nos proporciona ao seu lado.

Gostaria de expressar gratidão e agradecimento ao professor Raphael Maciel, pelas orientações, pela paciência e disposição para desenvolver este projeto, me dando todo o suporte que eu precisava para execução da pesquisa.

Por fim, agradeço ao IFPB - Campus Cajazeiras por me proporcionar educação de alto nível e experiências espetaculares.

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços, repetidos dia após dia.”*

*Leo Tolstoy*



## RESUMO

Instrumentos musicais de corda apresentam diferentes comportamentos em relação à sua afinação, isto deve-se, em geral, à sensibilidade do instrumento às condições do ambiente em que são utilizados e armazenados. Fatores como temperatura, umidade e manuseio adequado ou inadequado afetam diretamente a afinação desses instrumentos e, conseqüentemente, seu desempenho. Portanto, o usuário precisa ter conhecimento para realizar os ajustes necessários quando necessário. Nesse contexto, este trabalho aborda o desenvolvimento de um protótipo capaz de realizar a afinação de modo automático, identificando as frequências de vibração das cordas e ajustando-as conforme os padrões desejados. A técnica da transformada rápida de Fourier (FFT) foi utilizada para identificar as respectivas frequências de cada corda de um violão com encordoamento de aço. O ajuste das cordas é feito a partir de um sistema eletromecânico em malha fechada. Resultados obtidos a partir de experimentos são apresentados para comprovar o desempenho do dispositivo proposto neste trabalho

**Palavras-Chave:** Afinação, Frequência, FFT, Controle

## **ABSTRACT**

Stringed musical instruments exhibit different behaviors regarding their tuning, which is generally due to their sensitivity to the environmental conditions in which they are used and stored. Factors such as temperature, humidity, and appropriate or inappropriate handling directly affect the tuning of these instruments and, consequently, their performance. Therefore, users need to have knowledge to make the necessary adjustments when required. In this context, this work addresses the development of a prototype capable of automatically tuning the instrument, identifying the vibration frequencies of the strings and adjusting them according to the desired standards. The technique of Fast Fourier Transform (FFT) was used to identify the respective frequencies of each string of a steel-string guitar. The string adjustments are performed using a closed-loop electromechanical system. Results obtained from experiments are presented to demonstrate the performance of the proposed device in this work.

**Keywords:** Tuning, Frequency, FFT, Control.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema .....	18
Figura 2 - Arduino DUE R3 .....	19
Figura 3 - Módulo Driver Ponte H L298N .....	19
Figura 4 - Micro motor DC 12V .....	20
Figura 5 - Fluxograma do Algoritmo Desenvolvido .....	25
Figura 6 – Acoplamento .....	26
Figura 7 – Encordoador .....	26
Figura 8 - Implementação final do projeto .....	27
Figura 9 - Gráfico de desempenho para corda E(Mi) .....	28
Figura 10 - Gráfico de desempenho para corda A(Lá) .....	28
Figura 11 - Gráfico de desempenho para corda D(Ré) .....	29
Figura 12 - Gráfico de desempenho para corda G(Sol) .....	29
Figura 13 - Gráfico de desempenho para corda B(Si) .....	30
Figura 14 - Gráfico de desempenho para corda E(Mi) .....	30

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Frequências de afinação .....	20
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

IDE – Integrated Development Environment

FFT – Fast Fourier Transform

Hz – Hertz

DC – Direct Current

V – Volts

USB – Universal Serial Bus

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>16</b>
2.1 TRABALHOS RELACIONADOS	16
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>18</b>
3.1 MICROCONTROLADORES	18
3.1.1 MICROCONTROLADOR ARDUINO DUE R3	18
3.2 PONTE H L298N	19
3.3 MICRO MOTOR DC 12V	19
3.4 VIOLÃO E FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA	20
3.5 TRANSFORMADA DE FOURIER	20
3.6 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
4.1 CAPTAÇÃO E COMPARAÇÃO DO SINAL	23
4.2 COMUNICAÇÃO E CONTROLE	23
4.3 SISTEMA ELETROMECHANICO	25
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>27</b>
<b>6 DISCUSSÕES</b>	<b>31</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>32</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>36</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>37</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>39</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Instrumentos musicais de corda, como violões, guitarras e pianos, são compostos por componentes metálicos e orgânicos, principalmente madeira. Para que possam emitir sons adequados, é necessário afiná-los regularmente de acordo com padrões de formação de acordes observados na teoria musical básica. Esse processo pode ser realizado por músicos ou especialistas em instrumentos (luthier) utilizando a afinação "de ouvido", na qual não se utiliza nenhum equipamento eletrônico. No entanto, essa técnica pode não ser tão precisa quanto se gostaria. Outra opção é utilizar equipamentos comerciais chamados afinadores, que captam as frequências das notas emitidas pelo instrumento musical e as comparam com uma referência.

Existem 7 notas musicais, além de 5 “acidentes”, de modo que durante o processo de afinação. Cada nota musical possui uma determinada frequência de ressonância que precisa ser captada pelo dispositivo afinador. O profissional que está afinando o instrumento compara o que está sendo captado pelo instrumento com uma referência, que é a nota musical desejada. No entanto, a maioria dos dispositivos comerciais apenas captam a frequência e não realizam a afinação do instrumento. São os músicos que precisam realizar os procedimentos para chegar ao som desejado.

A afinação de um instrumento musical pode ser um procedimento repetitivo, especialmente em um ambiente de produção comercial, no qual diversos instrumentos precisam passar por esse processo. É necessário tomar um tempo razoável para afinar uma grande quantidade de instrumentos, lembrando que periodicamente é necessário afiná-los novamente. Além disso, é importante que as partes como tarraxas e pontes estejam sempre em boas condições, já que alterações de temperatura do ambiente podem causar a expansão ou contração dos componentes do instrumento, como cordas e tensores, que conseqüentemente podem causar a variação da frequência emitida, ou seja, o instrumento desafina. (BERNI, 2016; GRÜNIG, 2014).

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Nesta direção, o presente trabalho tem como objetivo propor o desenvolvimento de um sistema automático para a afinação de instrumentos musicais, com a finalidade de eliminar a necessidade de intervenção do usuário durante o procedimento. Essa proposta visa proporcionar uma solução tecnológica que permita o ajuste preciso e eficiente da afinação do instrumento,



de forma automatizada e sem exigir a habilidade ou conhecimento musical do usuário. A implementação desse sistema tem o potencial de facilitar o processo de afinação de instrumentos musicais, garantindo resultados mais consistentes e precisos.

#### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o sistema de captação e identificação da nota musical (frequência de ressonância);
- Construir um dispositivo eletromecânico que possa ser acoplado ao instrumento musical;
- Integrar o dispositivo eletromecânico ao sistema de identificação da frequência sonora;
- Projetar um sistema de controle em malha fechada (ver figura 1).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Durante o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), foi identificada a necessidade de realizar uma revisão de literatura abrangente sobre trabalhos relacionados ao tema proposto. Com o objetivo de ampliar o conhecimento existente, dedicamos esforços para explorar ainda mais as pesquisas e estudos já publicados na área. Essa abordagem permitiu uma fundamentação teórica sólida, fornecendo embasamento para a construção e desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.1 TRABALHOS RELACIONADOS

A afinação de instrumentos musicais é uma atividade essencial para garantir a qualidade sonora durante a execução musical. Tradicionalmente, a afinação é realizada manualmente pelos músicos, requerendo conhecimento e habilidade. No entanto, com os avanços tecnológicos, têm surgido diversas abordagens automatizadas para auxiliar nesse processo. Nesta revisão bibliográfica, serão abordados diversos trabalhos que exploram técnicas de afinação automática de instrumentos musicais, com foco no violão e guitarra.

Em 2017 foi desenvolvido um sistema automatizado para a afinação de violão elétrico. O autor desenvolveu um sistema baseado em um microcontrolador que monitora as frequências das cordas e realiza ajustes automáticos utilizando motores de passo. O trabalho apresenta resultados promissores, demonstrando a viabilidade da automação do processo de afinação.(Becchi, 2017)

Mais uma pesquisa desenvolveu um dispositivo eletrônico automatizado para afinação de violão. O trabalho utiliza sensores de frequência para identificar a afinação atual das cordas e realiza ajustes automáticos por meio de servomotores. O dispositivo é portátil e de fácil utilização, proporcionando uma solução prática para músicos que desejam uma afinação precisa e rápida.(Oliveira, 2019)

Outro trabalho realizado, aborda a comunicação USB com microcontroladores e apresenta uma aplicação prática para afinação automática de instrumentos musicais. O autor desenvolveu um sistema de comunicação entre um microcontrolador e um software de afinação, permitindo a automação do processo. O trabalho destaca a importância da comunicação eficiente entre os dispositivos para o bom funcionamento do sistema.(Santos, 2009)

Outra pesquisa, propõe um afinador digital implementado em FPGA

(Field-Programmable Gate Array) para violão e guitarra elétrica. O trabalho utiliza técnicas de processamento de sinal digital para identificar e ajustar as frequências das cordas de forma automática. A implementação em FPGA permite um processamento de alta velocidade, resultando em uma resposta rápida e precisa. (Mancera, 2013)

Uma dissertação de mestrado aborda o desenvolvimento de um software de processamento e realimentação inteligente de informação para afinação de guitarras. O trabalho utiliza algoritmos de processamento de sinal e técnicas de inteligência artificial para identificar e ajustar as frequências das cordas. A abordagem inteligente permite uma afinação mais precisa e adaptativa. (Pinto, 2015)

O trabalho realizado em 2018, propõe a integração entre Arduino e MATLAB Simulink para o desenvolvimento e implementação de um afinador automático de guitarra. O autor utiliza o Arduino como plataforma de hardware e o MATLAB Simulink como ambiente de programação para realizar o processamento de sinal e controle do sistema. O trabalho destaca a facilidade de implementação e a flexibilidade proporcionada pela integração entre as duas tecnologias. (Marques, 2018)

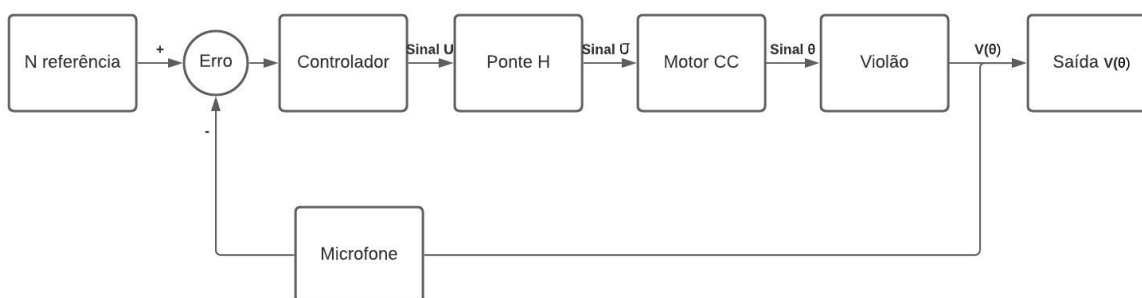
Ainda em 2018, um propôs a utilização de um algoritmo com dois modelos de referência para a auto sintonia de sistemas de controle automático, nos quais processos contínuos que acumulam informações sobre a dinâmica do objeto controlado são implementados. Esse algoritmo é usado para determinar valores ótimos dos parâmetros ajustáveis, avaliar o desempenho do ACS por meio de modelagem matemática e alterar automaticamente os fatores de ajuste do ACS, caso o desempenho do ACS se aproxime dos limites dos valores admissíveis dos critérios de qualidade definidos nas especificações. (ZADOROZHNEYA; LISITSYN, 2018)

Outra pesquisa envolve o uso de processamento e amplificação de sinais, manipulação de circuitos integrados e integração Bluetooth com uma interface de usuário Android. Os processos mencionados são utilizados em conjunto para controlar as frequências das cordas do baixo elétrico por meio de motores de corrente contínua. (Ahrens, T.; Capo, A.; Wong, E., 2015)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos adotados neste estudo, fornecendo informações detalhadas sobre os equipamentos utilizados e os procedimentos experimentais. A descrição clara e precisa dessas informações é fundamental para permitir a replicação do estudo e a compreensão dos resultados obtidos. Na figura 1 pode-se observar um diagrama de blocos do sistema proposto neste trabalho.

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema indicado



Fonte: De autoria própria

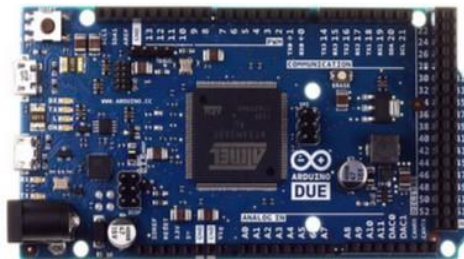
#### 3.1 MICROCONTROLADORES

Microcontrolador é um circuito integrado composto por um microprocessador e dispositivos periféricos essenciais para o seu funcionamento como: memória de programa e de dados; e também periféricos acessórios como: interfaces de entrada e saída de dados. Os microcontroladores também são equipados com diversos circuitos eletrônicos tais como: conversor analógico digital, temporizadores, comparadores, interfaces de comunicação, geradores de pulsos, entre outros. (SANTOS, 2009)

##### 3.1.1 Microcontrolador Arduino DUE R3

O Arduino DUE R3 é uma placa baseada no microcontrolador Atmel SAM3X8E CPU ARM Cortex-M3, com 96 KBytes de SRAM e 512 KBytes de memória flash para o código. A configuração da placa projetada está mostrada na figura 2. O arduino foi selecionado devido sua facilidade em integração com outros dispositivos, oferecendo mais opções para se trabalhar dentro do projeto e diminuindo o custo no desenvolvimento do protótipo em questão.

Figura 2 - Arduino DUE R3



Fonte: embarcados.com

### 3.2 Ponte H L298N

O Módulo Driver Ponte H - L298N, como mostra a figura 2, é um módulo de controle que é capaz de trabalhar com dois motores DC ou um motor de passo. Ele é baseado no driver L298N, sendo muito útil para controle robótico e mecânico, trabalha com motores de tensões de 5 a 35V, com tensão lógica de 5V, suportando no máximo 2A.

Figura 3 - Módulo Driver Ponte H L298N



Fonte: Saravati.com

### 3.3 Micro motor DC 12V

O AK360/2.2PF12R44SC, abaixo na figura 3, é um motor 12V DC pequeno e robusto, com uma caixa de redução de 44 RPM, adequado para aplicações em equipamentos eletromecânicos, robótica e automação. Esse motor é equipado com uma caixa de redução contendo engrenagens robustas, as quais aumentam o torque e mantêm sua rotação estável.

Figura 4 - Micro motor DC 12V



Fonte: Saravati.com

### 3.4 Violão e frequências de ressonância

O violão é um instrumento musical composto por seis cordas, sendo fabricado em sua maioria com madeira. Possui um corpo que favorece a propagação do som por meio de uma acústica característica. Cada corda do violão apresenta uma frequência de ressonância específica, que por sua vez, é determinada a partir de alguns fatores essenciais, sendo eles a tensão sobre a corda, o seu comprimento, e pela forma da caixa de ressonância do instrumento, seu formato e tamanho tem influência na obtenção de frequências específicas. No momento em que a frequência natural de vibração das cordas e a frequência de ressonância da caixa acústica são iguais, há um aumento da intensidade sonora, fenômeno denominado ressonância acústica. Na tabela 1 estão contidas as informações sobre as frequências de cada corda de acordo com a afinação padrão.

Tabela 1 - Frequências de afinação

CORDA	NOTA	FREQUÊNCIA	NOTAÇÃO FORMAL
1(mais aguda)	Mi	330 Hz	E4
2	Si	247 Hz	B3
3	Sol	196 Hz	G3
4	Ré	146 Hz	D3
5	Lá	110 Hz	A2
6	Mi	82 Hz	E2

### 3.5 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é uma técnica matemática amplamente utilizada em áreas como a engenharia, a física e a computação para análise de sinais e sistemas. Ela permite decompor um sinal em suas componentes de frequência, permitindo uma melhor compreensão do comportamento do sinal no domínio da frequência. A transformada de Fourier foi proposta por Joseph Fourier em 1822 e desde então tem sido amplamente utilizada em diversos campos. Em particular, ela tem aplicações importantes em áreas como o processamento de sinais de áudio e vídeo, comunicações sem fio, análise de sistemas dinâmicos e resolução de equações diferenciais parciais.

Para calcular a transformada de Fourier de um sinal contínuo, utiliza-se a integral de Fourier, enquanto que para sinais discretos utiliza-se a transformada discreta de Fourier. Essencialmente, a transformada de Fourier converte um sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência, permitindo analisar suas características espectrais, as integrais que definem a transformada (1) e a transformada inversa(2) estão representadas logo abaixo. Existem diversas técnicas e algoritmos para calcular a transformada de Fourier, sendo que a mais comum é o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform).

Transformada de Fourier

$$\mathcal{F}\{f(x)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\alpha x} dx = F(\alpha) \quad (1)$$

Transformada inversa de Fourier

$$\mathcal{F}^{-1}\{F(\alpha)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha)e^{i\alpha x} d\alpha = f(x) \quad (2)$$

A Transformada de Fourier é uma técnica que usa exponenciais complexas de diferentes frequências como blocos fundamentais. Se pensarmos em um sinal de entrada, representado por  $\mathbf{F(x)}$ , a Transformada de Fourier desse sinal é chamada de espectro do sinal, representado por  $\mathbf{F(\alpha)}$ . É como se o espectro do sinal revelasse as diferentes frequências presentes nele. Se pensarmos também em  $\mathbf{F(x)}$  como uma resposta de um impulso que atua sobre uma entrada de dados, produzindo uma saída de dados. A Transformada de Fourier do espectro de resposta é chamada de filtro da frequência de resposta, esse filtro da frequência de resposta representa como o impulso irá responder a diferentes frequências. Ou seja, a resposta do impulso é obtida por meio da Transformada Inversa de Fourier aplicada ao filtro da frequência de resposta.

A Transformada de Fourier é uma ferramenta que nos permite analisar um sinal ou resposta de impulso em termos de suas diferentes frequências. O espectro do sinal mostra as frequências presentes, enquanto o filtro da frequência de resposta representa como o impulso reage a cada frequência. A Transformada Inversa de Fourier nos permite obter a resposta do impulso a partir do filtro de frequência.

A transformada rápida de Fourier (FFT), utilizada neste trabalho, é uma técnica amplamente utilizada em Python para processamento de sinais e análise de dados. O Python possui uma biblioteca padrão para cálculo da FFT, chamada de "numpy.fft". A biblioteca numpy.fft contém funções para cálculo da FFT, bem como suas variantes (FFT inversa, FFT multidimensional, FFT com janela, etc.). A função básica para cálculo da FFT de um sinal unidimensional é a "numpy.fft.fft". Para utilizar a função numpy.fft.fft, basta importar a biblioteca numpy e chamar a função passando como parâmetro o sinal a ser transformado. O resultado da FFT é um vetor complexo, contendo os componentes de frequência do sinal.

A compreensão da transformada de Fourier é fundamental para diversas áreas da engenharia, como a engenharia elétrica, engenharia mecânica e a engenharia de sistemas. Ela é uma ferramenta poderosa para análise de sistemas lineares e invariantes no tempo, e é amplamente utilizada na análise de sinais de áudio e vídeo, processamento de imagens e reconhecimento de padrões.

### 3.6 Procedimentos experimentais

Neste momento, a nota musical de referência será comparada com o sinal medido pelo elemento sensor (microfone), a fim de gerar um sinal de erro (E). Esse sinal de Erro será processado pelo controlador, resultando em um sinal de controle (U), que acionará um sistema eletromecânico composto por uma ponte H e um motor de corrente contínua. Esse sistema será acoplado ao instrumento musical. A ponte H fornecerá o sinal de controle ( $\bar{U}$ ), que determinará o sentido de rotação do motor (horário ou anti-horário), levando-o a girar até um ângulo  $\theta$  específico. A saída do sistema, que pode ser um violão, por exemplo, será um sinal sonoro variando em frequência de acordo com o ângulo  $\theta$ . Esse sinal sonoro será captado por um microfone, que fornecerá realimentação para o sistema de controle proposto. (figura 1)



## 4 METODOLOGIA

O projeto pode ser dividido em duas partes: uma aplicação informática para o usuário que está descrito todo o algoritmo de captação, conversão analógico-digital, comparação dos valores obtidos e comando do motor, e um circuito de controle com utilização do arduino, ponte H, fonte 12V e motor DC.

O funcionamento do projeto é feito conforme a configuração adotada no algoritmo escrito. Os sinais sonoros são captados via microfone, e através da transformada rápida de Fourier (FFT) é feita a conversão deste sinal, utilizando os valores das frequências obtidas em hertz (Hz) para os devidos cálculos de diferença com relação aos valores de referências pré estabelecidos.

### 4.1 CAPTAÇÃO E COMPARAÇÃO DO SINAL

A aplicação do algoritmo consiste na captação, conversão, comparação, comunicação e controle do sinal. Nesse caso, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado, que é usado para programação em Python, o PyCharm, de modo simultâneo com o arduino. A captação foi realizada através do microfone de um notebook, este podendo ser um dispositivo periférico externo conectado ao computador via USB, ou o seu próprio dispositivo interno do notebook. O reconhecimento foi possível com a utilização da biblioteca pyaudio que habilita o canal do microfone e todo o reconhecimento do sinal em tempo real.

Para realizar a conversão do sinal, a transformada rápida de Fourier foi aplicada para que se pudesse obter os respectivos valores das frequências destes sinais captados, e para que sua utilização fosse possível na comparação dos valores com relação às notas de referência da afinação padrão.

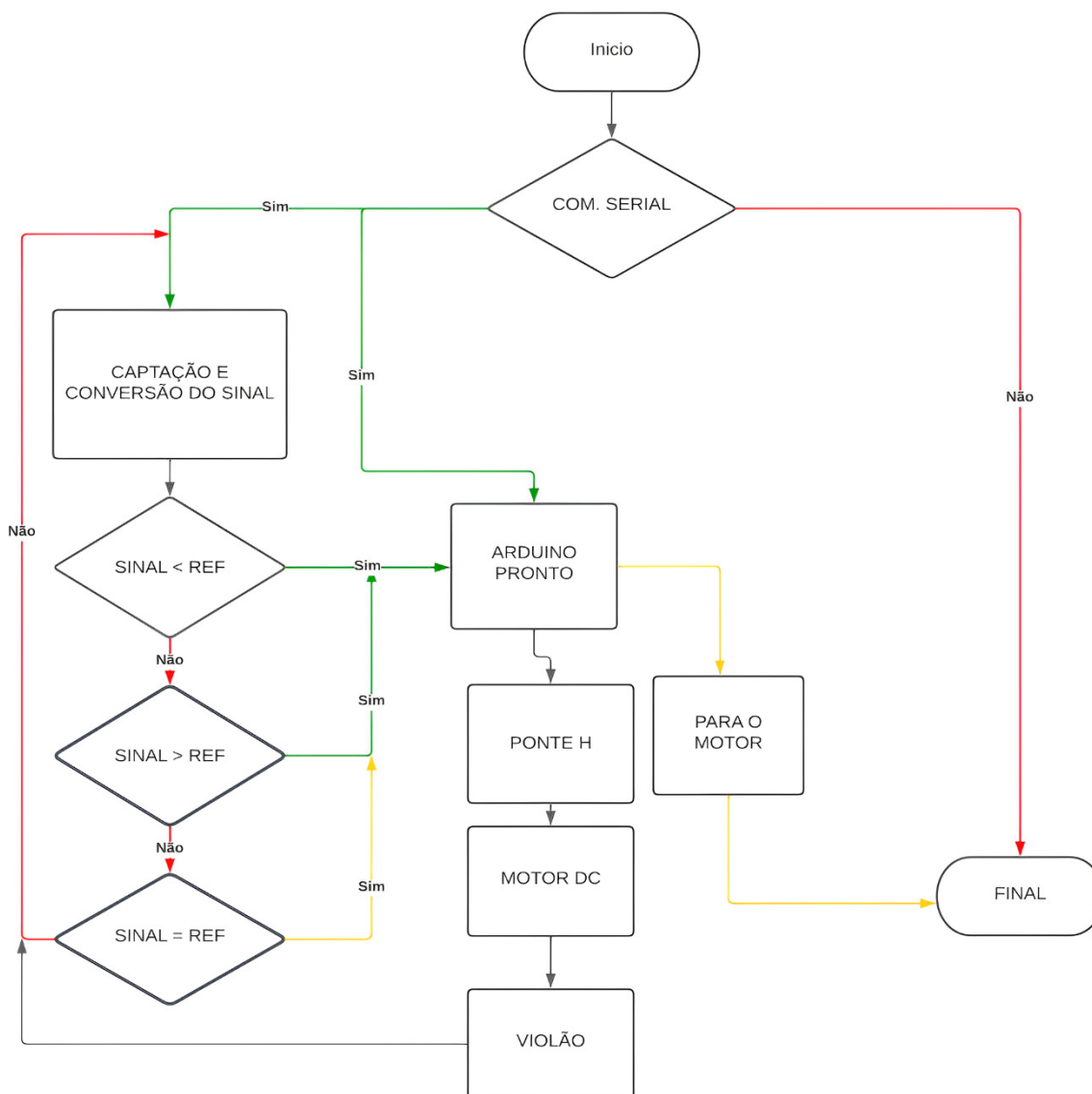
### 4.2 COMUNICAÇÃO E CONTROLE

A comunicação entre o PyCharm e o Arduino foi realizada por meio da biblioteca Pyserial, que permite a comunicação serial entre a IDE do Arduino e o PyCharm. Essa integração possibilitou a execução das ações desde a captação dos dados até a comparação dos valores obtidos com as referências. Após esse processo, o Arduino precisa apenas de uma variável, que é o valor de parâmetro, para tomar a decisão sobre qual sentido o eixo do motor deve ser girado. Existem apenas três valores possíveis para essa variável:

- Valor '1', caso o resultado seja menor que a referência. Isso faz com que o motor seja ativado no sentido anti-horário, tensionando a corda e indicando que a afinação está abaixo da adequada.
- Valor '2', caso o resultado seja maior que a referência. Nesse caso, o Arduino comanda o motor para que gire no sentido horário, diminuindo a tensão sobre a corda e indicando que a afinação está acima da adequada.
- Valor '0', caso o resultado esteja dentro dos valores desejados. Nessa situação, o Arduino faz com que o motor pare, indicando que a afinação está nos valores adequados.

Para alcançar um controle em tempo real do motor, foi necessário utilizar a ferramenta `threading` na escrita em Python. Dessa forma, o algoritmo passou a executar duas tarefas simultaneamente, ao invés de uma tarefa após a outra. Durante a execução das ações, ocorre um pequeno delay que, na prática, é imperceptível. A utilização da ferramenta `threading` possibilitou o controle do motor, uma vez que o algoritmo retorna um valor em tempo real para o Arduino com base nas comparações que eram feitas em tempo real no momento em que a corda do instrumento era tocada. A figura 5, apresentada abaixo, resalta as decisões tomadas pelo algoritmo.

Figura 5 - Fluxograma do Algoritmo Desenvolvido



Fonte: De autoria própria

### 4.3 SISTEMA ELETROMECAÂNICO

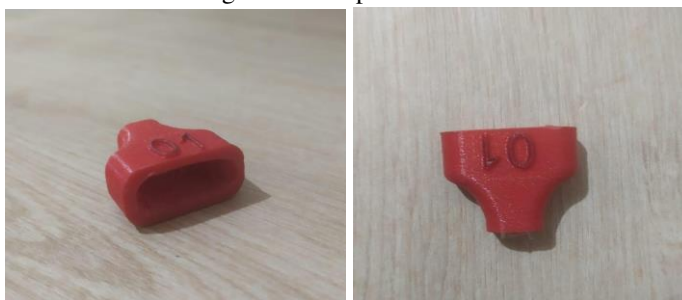
Para o completo funcionamento do sistema eletromecânico em laboratório, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Fonte de alimentação 12V;
- Ponte H L298N;
- Motor DC com redução;

- Arduino DUE R3;
- Acoplamento.

Para a alimentação da ponte H e do motor, foi adotada a tensão nominal de 12V, seguindo as orientações contidas no datasheet. Já a alimentação do Arduino é feita através do cabo USB do notebook, que fornece uma tensão de 5V. O acoplamento utilizado para conectar o motor às tarraxas do violão foi confeccionado em uma impressora 3D utilizando o material acrilonitrila butadieno estireno (ABS). As medidas do eixo do motor foram utilizadas para produzir o encaixe, enquanto as medidas do acoplamento para as tarraxas do violão foram obtidas a partir do encordoador padrão, uma peça utilizada para instalação de cordas em violões. As figuras 6 e 7 apresentam as peças citadas.

Figura 6 - Acoplamento



Fonte: De autoria própria.

Figura 7 - Encordoador



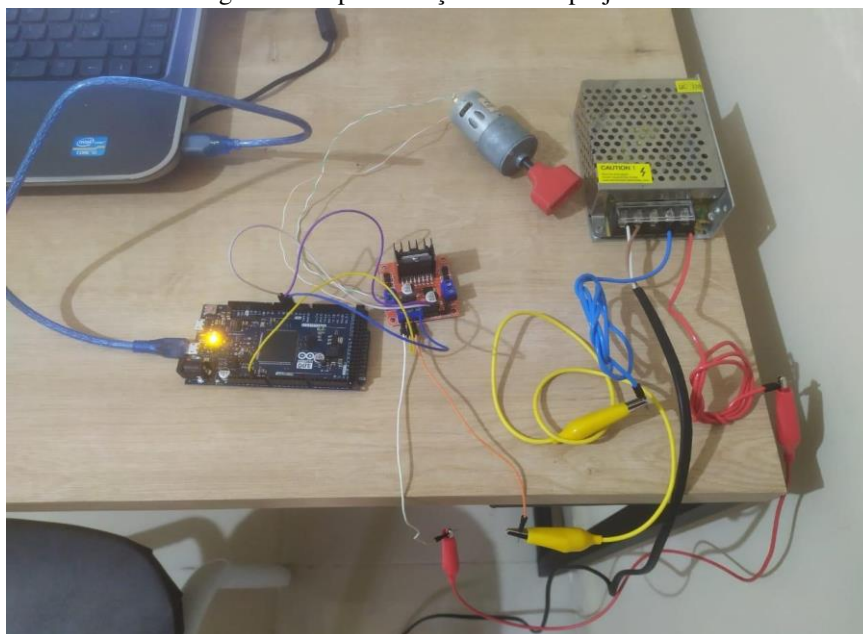
Fonte: Google imagens

## 5 RESULTADOS

Mediante a conclusão do desenvolvimento do projeto, foram realizados os testes necessários para a verificação dos resultados através da execução dos códigos do PyCharm e do Arduino. Todos os resultados obtidos e seus ajustes eventuais para o funcionamento deste Afinador Automatizado para Violões serão apresentados nesta seção.

A figura 8 apresenta o sistema completo, com o Arduino conectado ao notebook e as conexões entre a ponte H, o motor e o Arduino.

Figura 8 - Implementação final do projeto



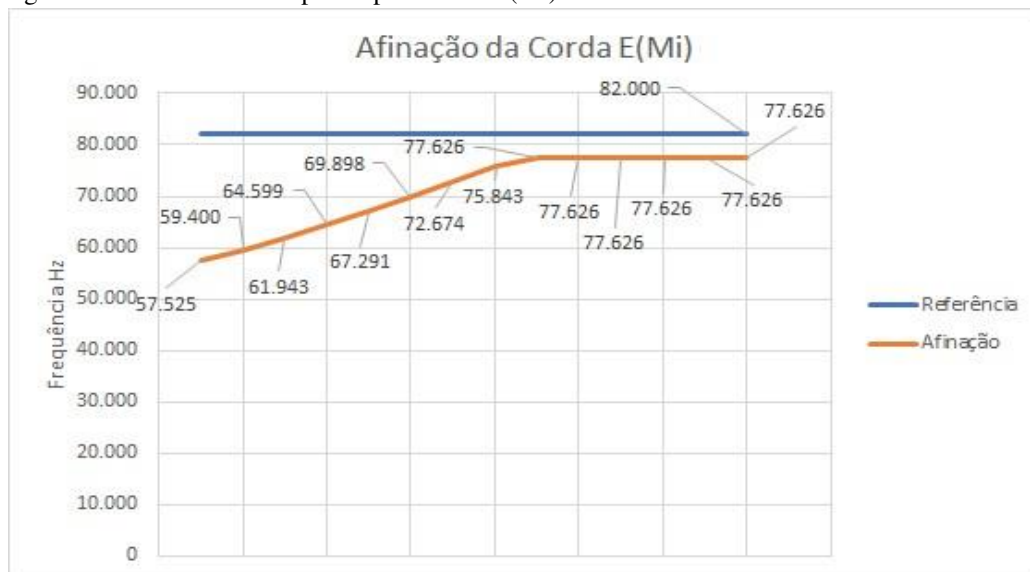
Fonte: De autoria própria.

Após a conclusão do desenvolvimento do projeto, foram realizados os testes necessários para avaliação dos resultados, através da execução dos códigos no PyCharm e no Arduino. Todos os resultados e ajustes realizados para o funcionamento do Afinador Automatizado para Violões serão apresentados nesta seção.

Cada parte do projeto foi testada separadamente durante o seu desenvolvimento, incluindo os algoritmos e os testes finais de desempenho do sistema completo. Observou-se que o algoritmo escrito em Python precisava que duas ações ocorressem simultaneamente, ao invés de uma após a outra. Para isso, foi adotada a ferramenta threading, que permitiu a execução das tarefas de captação do áudio e comparações entre referência e sinal medido de forma praticamente simultânea, com apenas um pequeno delay de diferença. Essa ferramenta possibilitou o retorno de um valor em tempo real para o Arduino. A seguir, as figuras

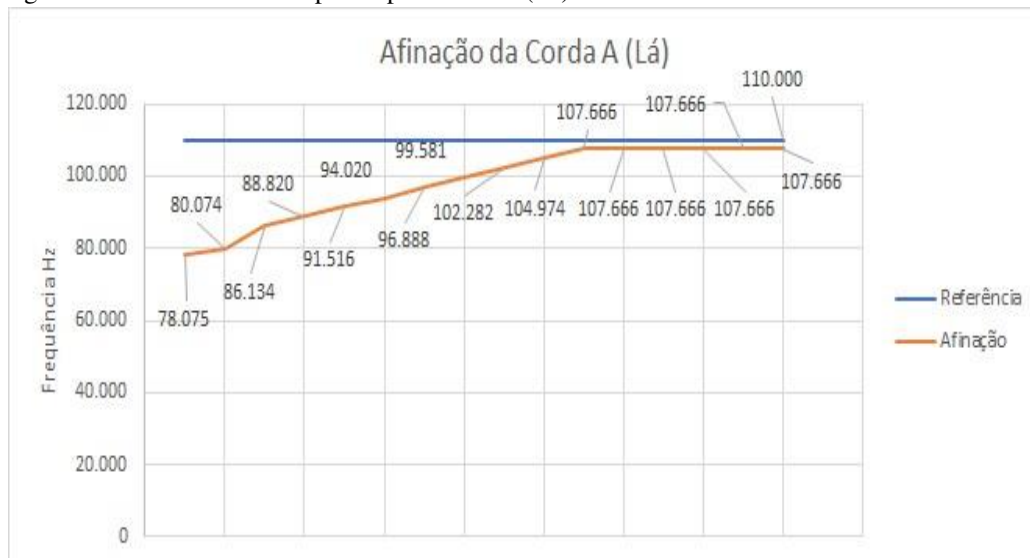
apresentadas mostram o desempenho obtido nos testes de afinação. Foi adotado um valor de histerese de 5 Hz para a avaliação dos resultados.

Figura 9 - Gráfico de desempenho para corda E(Mi)



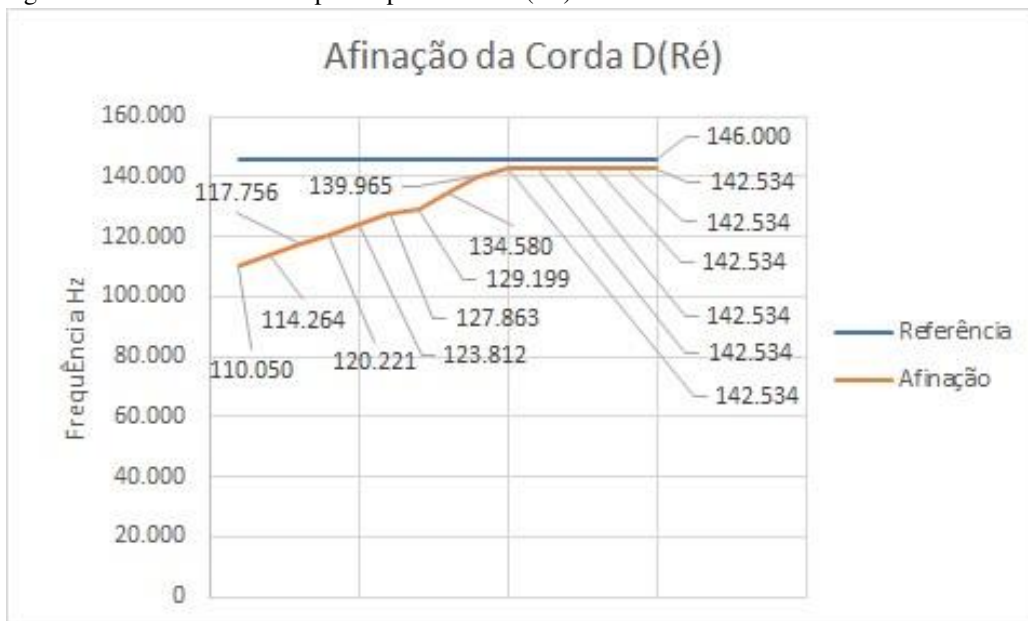
Fonte: De autoria própria.

Figura 10 - Gráfico de desempenho para corda A(Lá)



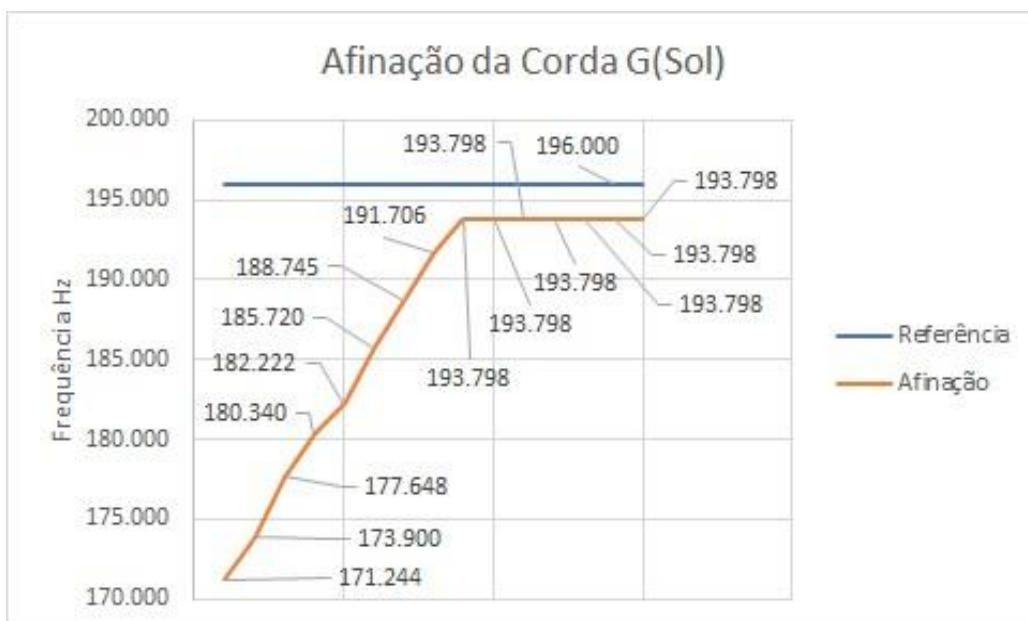
Fonte: De autoria própria.

Figura 11 - Gráfico de desempenho para corda D(Ré)



Fonte: De autoria própria. Figura 12 -

Gráfico de desempenho para corda G(Sol)



Fonte: De autoria própria.





## 6 DISCUSSÕES

Com a etapa de testes concluída, constatou-se que a aplicação de filtros é um aspecto relevante a ser considerado para pesquisas futuras. A utilização desses filtros demonstrou a capacidade de obter resultados mais precisos e aprimorados. Os ruídos que são captados juntamente com as frequências das cordas têm impacto significativo na análise, tornando-a mais complexa e afetando o resultado final. Nesse sentido, a implementação de técnicas de filtragem pode ser explorada como uma alternativa para mitigar os efeitos dos ruídos, possibilitando análises mais acuradas e confiáveis. Essa abordagem pode contribuir para a melhoria do desempenho do sistema e para a obtenção de resultados mais consistentes em estudos posteriores.

Além disso, no que diz respeito ao microcontrolador utilizado, é importante considerar a viabilidade econômica sem comprometer a qualidade do desempenho. Dessa forma, investigar alternativas de microcontroladores de baixo custo, mantendo uma performance satisfatória, mostra-se relevante para futuras pesquisas. Essa abordagem pode permitir um ajuste mais preciso das cordas, melhorando a qualidade sonora e a resposta do dispositivo.

Considerar a possibilidade de implementar afinações em tons alternativos, visto que pode abrir novas oportunidades para músicos e compositores, permitindo a criação de novas sonoridades e expandindo as possibilidades musicais. Portanto, é interessante investigar a viabilidade técnica e a aceitação do público em relação a essa funcionalidade adicional.

Por fim, é relevante mencionar a importância de conseguir captar o som de todas as cordas, juntamente com a afinação simultânea de ambas. Essa capacidade contribui para uma experiência mais completa e satisfatória ao utilizar o dispositivo. Logo, é fundamental explorar técnicas de captação de som que possam garantir a detecção precisa das vibrações em todas as cordas, mantendo a integridade da afinação simultânea. Essas considerações abrem caminho para futuras pesquisas no campo, proporcionando oportunidades para aprimorar o sistema proposto, explorar novas funcionalidades e atender às necessidades e expectativas dos músicos e entusiastas da música.

## 7 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento deste trabalho, foi atingido o principal objetivo, um afinador automatizado para violões. Construído com aplicações informáticas e controlando um motor pelo método on/off através do Arduino, o afinador obteve um resultado que se manteve dentro da tolerância de 5 Hz estabelecida para todas as seis frequências de referência.

O objetivo deste trabalho em questão, foi produzir um afinador automatizado integrando python com o arduíno e utilizando este microcontrolador para usar o método on/off de controle. Logo, foi iniciado uma série de estudos para análise sobre quais materiais seriam utilizados, bem como quais os tipos de aplicações informáticas seriam desenvolvidas. Assim foram definidos todos os componentes para o desenvolvimento do projeto.

Após a aquisição dos equipamentos, foi desenvolvido o algoritmo que torna possível o reconhecimento sonoro através de um microfone em tempo real, a partir da escrita para a comparação dos valores entre referência e sinal medido, surgiu a necessidade de implementar uma ferramenta que fizesse essas duas tarefas de forma simultânea, o método threading. Após essas duas tarefas estarem desenvolvidas e funcionais, foi feita a comunicação via serial para com o Arduíno e o envio de variáveis para o mesmo, variáveis essas responsáveis por ligarem e desligarem o motor nos sentidos necessários para funcionamento.

Com os resultados obtidos e as correções realizadas, notou-se que o objetivo foi alcançado, sendo um afinador capaz de atuar de maneira autônoma sobre as tarraxas do instrumento, realizando a afinação do mesmo.

Uma possível alteração seria aumentar o leque de afinações para o usuário que necessitar de mais opções de afinação, para que outros instrumentos como cavaquinho e ukulele possam ser utilizados para afinação, assim como as afinações em tons não convencionais e o reconhecimento simultâneo das seis cordas bem como análises para implementação de microcontroladores de menor custo e resultados melhores no controle.

De modo geral, o trabalho desenvolvido atende às expectativas e mostra que campos distintos como a música e a tecnologia podem ser integrados de forma que seus usuários possam ter mais recursos e se torne mais fácil e intuitiva a utilização dos instrumentos.

## REFERÊNCIAS

BECCHI, Natan Gabriel. **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA AFINAÇÃO DE VIOLÃO ELÉTRICO**. 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1664/1/2017NatanGabrielBecchi.PDF>. Acesso em: 28 fev. 2021.

OLIVEIRA, Daniel Vaz de. **DISPOSITIVO ELETRÔNICO AUTOMATIZADO PARA AFINAR VIOLÃO**. 2019. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado de Engenharia de Computação, Centro Universitário de Anápolis - Unievangélica, Anápolis, 2019. Disponível em: [http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/9338/6/2\\_WiDanielJonatas.pdf](http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/9338/6/2_WiDanielJonatas.pdf). Acesso em: 28 fev. 2021.

SOUZA, Jhonathan Junio de. Afinação eletrônica de instrumentos musicais. **Coordenação do Curso de Tecnologia em Automação Industria**. Paraná, p. 01-08. nov. 2012. Disponível em: <https://jhonathanjs.files.wordpress.com/2012/11/artigo-afinac3a7c3a3o-eletrc3b4nica.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2021.

GRÜNIG, Bruno. Teoria musical aplicada ao violão. 1. ed., 2014.

BERNI, Alexandre A. Temperatura X Afinação de Instrumentos Musicais. 2016. Santo angelo – Música na veia, 18 mai. 2016. Disponível em: <http://blog.santoangelo.com.br/temperatura-x-afinacao-de-instrumentos-musicais/>. Acesso em: 10 set. 2022.

MANCERA, Telos Galante. **AFINADOR DIGITAL PARA VIOLÃO E GUITARRA ELÉTRICA IMPLEMENTADO EM FPGA**. Orientadora: Luiza Maria Romeiro Codá. 2013. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: [www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-08112013-164002/publico/Mancera\\_Telos\\_Galante.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-08112013-164002/publico/Mancera_Telos_Galante.pdf). Acesso em: 20 set. 2022.

PINTO, Pedro Guilherme de Sousa. **Software de Processamento e Realimentação Inteligente de Informação para Afinação de Guitarras**. Orientador: Prof. João Manuel R. S. Tavares, Eng. Jorge Manuel de Matos Reis. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Software de Processamento e Realimentação Inteligente de Informação para Afinação de Guitarras Pedro Guilherme de Sousa Pinto Dissertação de Mestrado Orientadores: Prof. João Manuel R. S. Tavares Eng. Jorge Manuel de Matos Reis Mestrado Integrado em Engenharia

Mecânica, Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2015. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/89918/2/37404.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

**MARQUES, PEDRO CATUNDA. PEDRO CATUNDA MARQUES INTEGRAÇÃO ENTRE ARDUINO E MATLAB SIMULINK PARA DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM AFINADOR AUTOMÁTICO DE GUITARRA.**

Orientador: Prof. Dr. Galdenoro Botura Jr.. 2018. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.

Disponível em:

<https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariadeControleeAutomacao/galdenoro1906/trabalho-de-graduac807a771o---integrac807a771o-entre-arduino-e-matlab-simulink-pa-ra-desenvolvimento-e-implementac807a771o-de-um-afinador-automa769tico-de-guitarra--pe-dro-catunda-marques.pdf>. acesso em: 20 set. 2022.

**SANTOS, Leonardo de Sá Leal. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO USB COM MICROCONTROLADOR.** 2009. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

Disponível em: <https://docplayer.com.br/3877382-Sistema-de-comunicacao-usb-commicrocontrolador.html>.

Acesso em: 10 fev. 2023.

SMITH, Steven W. **Digital Signal Processing**. second edition. ed. San Diego, CA: California Technical Publishing, 1999. 643 p. Disponível [https://doc.lagout.org/science/0\\_Computer%20Science/9\\_Others/1\\_Digital%20Signal%20Processing/The%20Scientist%20and%20Engineer%27s%20Guide%20to%20DSP.pdf](https://doc.lagout.org/science/0_Computer%20Science/9_Others/1_Digital%20Signal%20Processing/The%20Scientist%20and%20Engineer%27s%20Guide%20to%20DSP.pdf).

ZADOROZHNYA, N. M.; LISITSYN, A. N. Automatic tuner for PID controllers with elements of artificial intelligence. **IOP conference series. Earth and environmental science**, v. 194, p. 022046, 2018.

WONG, T. A. A. C. **Automatic Guitar Tuner**. Disponível em: <[https://www.ece.ucf.edu/seniordesign/fa2014sp2015/g01/Final\\_SD2\\_Proj.pdf](https://www.ece.ucf.edu/seniordesign/fa2014sp2015/g01/Final_SD2_Proj.pdf)>. Acesso em: 22 maio. 2023.

NumPy Development Team. Numpy.fft. Disponível em:  
<https://numpy.org/doc/stable/reference/routines.fft.html>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

SOLOMON, Larry J.; BONJOUR, Xavier. Fundamentos da Física - Volume 1, 3ª Edição. LTC, 2013.

VIEIRA, M. L. **Transformada de Fourier**. Disponível em:  
<<https://matematicasimplificada.com/transformada-de-fourier/>>. Acesso em: 30 maio. 2023.

**APÊNDICE A - Algoritmo principal para execução do afinador**

```
from threading import Thread
from freq import frequency
from motor import engine
import serial

while True:
    try:
        arduino = serial.Serial('/dev/ttyACM0')
        print('Arduino conectado')
        break
    except:
        pass

class MotorThread(Thread):
    # constructor
    def __init__(self):
        Thread.__init__(self)
        self.freq = None
    def run(self):
        task1()
        task2()

def task1():
    engine(arduino, task2(), 330)
    #print('testing')

def task2():
    freqOut = frequency()
    return freqOut

while 1:
    thread = MotorThread()
    thread.start()
    thread.join()
```

**APÊNDICE B - Algoritmo de captação e conversão do sinal**

```

import pyaudio
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def frequency() -> object:
    """
    :rtype: object
    """
    CHUNK = 8192 # samples per frame
    FORMAT = pyaudio.paInt16 # audio format (bytes per
sample?)
    CHANNELS = 1 # single channel for microphone
    RATE = 44100 # samples per second
    p = pyaudio.PyAudio() # create pyaudio instantiation
    # stream object to get data from microphone
    stream = p.open(
        format=FORMAT,
        channels=CHANNELS,
        rate=RATE,
        input=True,
        output=True,
        frames_per_buffer=CHUNK )
    # plot
    #plt.ion()
    #fig = plt.figure(figsize=(13, 8))
    #plt.style.use('ggplot')
    #plt.rcParams['font.size'] = 18
    #ax = fig.add_subplot(111)
    #plt.xlabel('Frequency [Hz]')
    #plt.ylabel('Amplitude [Pa]')
    #ax.set_xscale('log')

```

```

plt.grid(True)
t = 0
#while t <= 1000:
plt.cla()
# record data chunk
stream.start_stream()
data = np.fromstring(stream.read(CHUNK), dtype=np.int16)
stream.stop_stream()
# mic sensitivity correction and bit conversion
mic_sens_dBV = 100 # -47.0 # mic sensitivity in dBV +
any gain
mic_sens_corr = np.power(10.0, mic_sens_dBV / 20.0) #
calculate mic sensitivity conversion factor
# (USB=5V, so 15 bits are used (the 16th for negatives))
and the manufacturer microphone sensitivity corrections
data = ((data / np.power(2.0, 15)) * 5.25) * mic_sens_corr
# compute FFT parameters
f_vec = RATE * np.arange(CHUNK / 2) / CHUNK # frequency
vector based on window size and sample rate
mic_low_freq = 15 # low frequency response of the mic
(mine in this case is 100 Hz)
low_freq_loc = np.argmin(np.abs(f_vec - mic_low_freq))
fft_data = (np.abs(np.fft.fft(data))[0:int(np.floor(CHUNK
/ 2))]) / CHUNK
fft_data[1:] = 2 * fft_data[1:]
max_loc = np.argmax(fft_data[low_freq_loc:]) +
low_freq_loc
plt.plot(f_vec, fft_data)
#ax.set_xlim([0, 1000])
#ax.set_ylim([0, 2 * np.max(fft_data)])
# max frequency resolution
plt.annotate(r'\Delta f_{max}$: %2.1f Hz' % (RATE / (2 *

```



```

CHUNK)), xy=(0.7, 0.92),
    #             xycoords='figure fraction')
    # annotate peak frequency
    #annot = ax.annotate('Freq: %2.1f' % (f_vec[max_loc]),
xy=(f_vec[max_loc], fft_data[max_loc]),
    #             xycoords='data', xytext=(0, 30),
textcoords='offset points',
    #             arrowprops=dict(arrowstyle="->"),
ha='center', va='bottom')
    #fig.canvas.draw()
    #fig.canvas.flush_events()
    t = t + 1
    freq = f_vec[max_loc] / 2
    # print(freq)

```

### APÊNDICE C - Algoritmo de Comparação Entrada/Referência

```

def engine(arduino, freq, ref) -> object:
    """
    :rtype: object
    """
    print(freq)
    print(ref)
    if freq < ref - 10:
        arduino.write('1'.encode())
    elif freq > ref + 10:
        arduino.write('2'.encode())
    elif freq > ref - 10 and freq < ref + 10:
        arduino.write('0'.encode())

```

**ANEXO A - Algoritmo de Controle para Arduino**

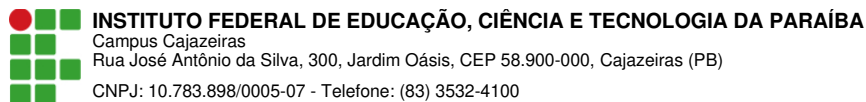
```
int velocidadeA = 3;
int IN1 = 4;
int IN2 = 5;
char cmd;
int velocidade = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(IN1, OUTPUT);
  pinMode(IN2, OUTPUT);
  pinMode(velocidadeA, OUTPUT);
}

void loop()
{
  cmd = Serial.read();
  if (cmd == '1')
  {
    digitalWrite(IN1, HIGH);
    digitalWrite(IN2, LOW);
    analogWrite(velocidadeA, 255);
  }

  else if (cmd == '2')
  {
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, HIGH);
    analogWrite(velocidadeA, 220);
  }

  else if (cmd == '0')
  {
    digitalWrite(IN1, LOW);
    digitalWrite(IN2, LOW);
  }
}
```



## Documento Digitalizado Restrito

### Trabalho de Conclusão de Curso

**Assunto:** Trabalho de Conclusão de Curso  
**Assinado por:** Thiago Araújo  
**Tipo do Documento:** Anexo  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Restrito  
**Hipótese Legal:** Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Thiago Manoel de Araújo, ALUNO (2015210110220) DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CAJAZEIRAS, em 31/05/2023 23:03:14.

Este documento foi armazenado no SUAP em 31/05/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 843162

Código de Autenticação: a5c71d8438

